恒、变磁通共铁心的自耦变压器的研制

李 程[1] 徐天奇[2] 李 琰[2]
（1. 保定天威保变电气股份有限公司 保定 071056
2. 云南民族大学电气信息工程学院 昆明 650500）



李 程 男 1977年生，本科，高级工程师，主要从事大型电力变压器电磁计算工作。



徐天奇（通讯作者）男 1978年生，博士，副教授，研究方向为智能电网、智能电子设备和智能一次设备等。

摘要：针对相近电压等级电网互联时，自耦联络变压器效益系数太低设计难的问题，本文提出了一种恒、变磁通共铁心的自耦变压器设计方案，通过多种工况的三维电磁场仿真计算，求解了采用共铁心结构的自耦变压器在空载运行时的铁心主磁通分布、各绕组电压，以及短路时的各绕组电流、变压器短路阻抗等重要参数。仿真和估算结果基本吻合，证明了采用该结构的可行性。采用这种全新结构的变压器，能有效节省主材成本、降低空载损耗及减轻产品运输重量，而且由于简化了产品结构，更便于生产加工，提升了产品运行的安全可靠性。

关键词：恒磁通 变磁通 自耦变压器
中图分类号：TM411.3

A Novel Design of Auto-Transformer with Common Core for Constant Flux and Variable Flux

Li Cheng[1] *Xu Tianqi*[2] *Li Yan*[2]
（1. Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd. Baoding 071056 China
2. Yunnan Minzu University Kunming 650500 China）

Abstract: When the power grids with close voltage levels, the design of tie auto-transformer would become difficult due to the low effectiveness coefficient. This paper proposes a novel design of auto-transformer with common core for constant flux and variable flux. Through three-dimensional electromagnetic field simulation and calculation, the no-load main flux distribution, voltages of windings as well as important parameters such as winding short-circuit currents and short-circuit impedance of the transformer are analyzed calculated. The simulation results basically coincide with the results from estimating, which illustrates the feasibility of the new structure. By adopting this transformer with new structure, the primary material cost and no-load loss as well as transport weight can be effectively reduced. Furthermore, with simplified structure, the transformer can be manufactured with lower difficulty level, and the operation reliability would be enhanced consequently.

Keywords: Constant flux, variable flux, auto-transformer

1 引言

由于某些国家和地区的电力市场高度自由化，电网规划的不协调性比较突出，有时电压等级相近甚至对等的电网之间需要互联，由此导致自耦联络变压器的效益系数很低[1]。对于此类自耦变压器，如果采用传统的设计方法，将会带来一些无法解决的问题，为了解决这些问题，文献 [2] 中采用了一种双器身结构的设计：其中一个器身为恒磁通，通过低压绕组 LV 为增压绕组 BV、调压绕组 TV、公共绕组 MV 励磁。BV 和 TV 串接后又为另一个变磁通器身上的励磁绕组 EV 供电，通过调整 TV 的匝数来改变 EV 的匝电势，EV 又为串联绕组 HV 励磁，这样就通过改变每匝电势达到了串联绕组有载调压的目的。但是，采用这种双器身、双铁心结构的方案，结构复杂、空载损耗高、运输重量和运输尺寸较大，如图 1 所示，为一台产品在吊装双器身。



图 1 双器身吊装图

Fig.1 Lifting diagram of dual body transformer

目前在国内外输变电线路（我国香港和广东近年来也出现有 500kV 和 400kV 电网互联的线路）上这类产品均采用这种双器身、双铁心结构的方案。如果能采用单铁心结构，既可大幅降低变压器的空载损耗和硅钢片用量，也能减小产品的运输体积和重量，产品技术经济性能更优。目前还没有关于这方面的研究报道。

2 产品基本参数

国外某项目需要一台自耦联络变压器，从高、中压额定电压比（$\frac{500}{\sqrt{3}}$ kV/ $\frac{400}{\sqrt{3}}$ kV）来看，该变压器高、中压侧电压相当接近，效益系数仅为 0.2。为克服高压 500kV 有载调压问题，采用了变磁通感应调压，通常这样的变压器为双铁心结构。下面将通过对变压器磁场的仿真计算，验证其是否可以采用双主柱的单铁心结构，其中一个铁心主柱为恒磁通，另一个铁心主柱为变磁通。

（1）产品型号：ODFPSZ—250000/500。

（2）额定电压：$\frac{500}{\sqrt{3}}$ $\pm 10\times 1.0\%$/ $\frac{400}{\sqrt{3}}$ /15kV。

（3）联结组别：YNa0d11（三相组）。

（4）铁心型式：铁心采用双主柱三框结构，边柱和铁轭的截面为主柱截面的 50%。

（5）接线原理图如图 2 所示。

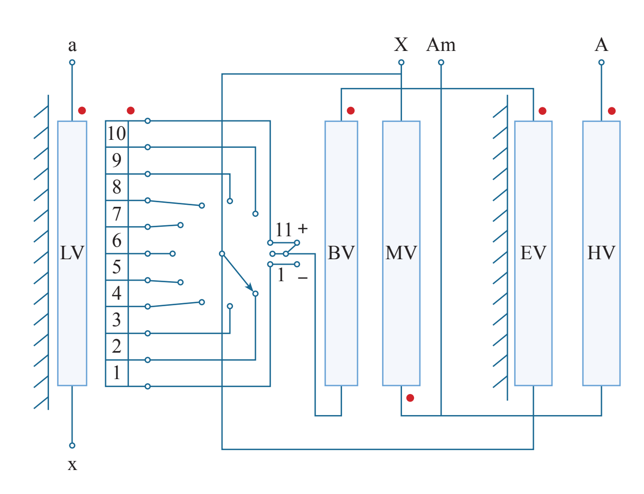


图 2 接线原理图

Fig.2 Wiring diagram

（6）铁心与绕组布置如图 3 所示。

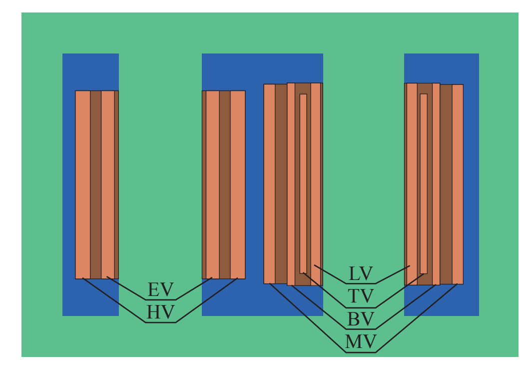


图 3 绕组排列图

Fig.3 Diagram of winding arrangement

主柱 I 绕组排列为：铁心 − EV 绕组 − HV 绕组。

主柱 II 绕组排列为：铁心 − LV 绕组 − TV 绕组 − BV 绕组 − MV 绕组。

3　仿真计算方法及条件

磁场仿真采用 Infolytica 公司的 MagNet 软件，采用有限元法对磁场进行仿真计算。

仿真工况 1：HV–MV 运行，HV 绕组最大分接。

仿真工况 2：HV–MV 运行，HV 绕组额定分接。

仿真工况 3：HV–MV 运行，HV 绕组最小分接。

以上三种仿真工况，均计算考察了：①空载情况下的铁心磁通分布。②短路情况下的各绕组电流及短路阻抗。

4　仿真建模

在 MagNet 中建模的方法有两种，第一种是利用 MagNet 所提供的三维几何建模功能直接搭建模型，但是这种建模方法不太便于搭建较为复杂的模型，耗时较多，且生成的模型修改起来很不方便；第二种方法是在其他参数化绘图软件中搭建好三维模型，再导入 MagNet 中，这种建模方法可以结合建模软件强大的三维参数化驱动功能，通过简单的输入结构参数，驱动模型更改，非常适合用作三维模型的搭建 [3]。本文根据产品的结构特点，采用 Pro/E 建立三维的二分之一模型，并导入 MagNet。设置边界为至铁心和绕组较远距离的切向自然边界和法向对称边界，材料属性则直接在 MagNet 丰富的自带材料库中选择。搭建完成的模型如图 4 所示。

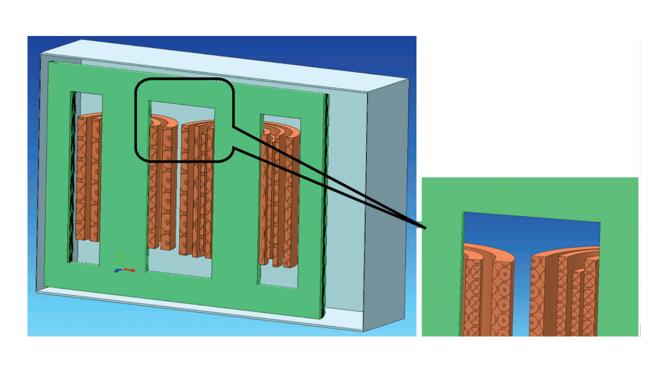


图 4　三维建模

Fig.4　3D modeling

MagNet 的场求解器可提供 3D 的静态场、时谐场和瞬态场求解功能，对于大型电力变压器，需要求解的电磁场是在工频正弦交流电激励下变化的准静态场，宜采用时谐场来处理，这样处理完全类似于电路中的相量法，分析的结果均可用有效值、最大值和平均值来显示 [4]。注意在选择时谐场求解工具后，不需要考虑铁磁材料的非线性，即设定铁心相对磁导率 μ_{Fe} 为常数[5]。

5　仿真分析

5.1　仿真分析 1：HV–MV 运行，HV 绕组最大分接

5.1.1　空载仿真

将主柱 II 的 MV 绕组加电压源激励：$V_1=\frac{400\,000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\div 2=163\ 299.3$V，TV 绕组与 BV 绕组正串后与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 5 所示。

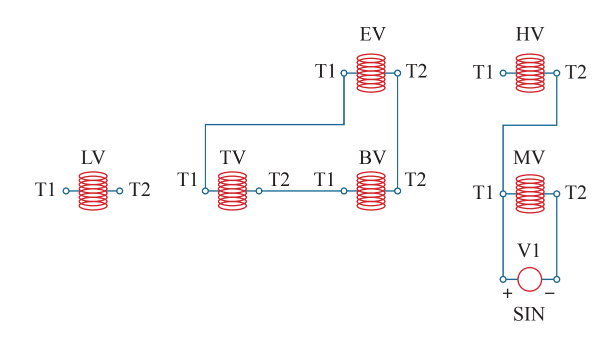


图 5　HVmax-MV 空载运行等效电路

Fig.5　HVmax-MV no load operation equivalent circuit

各绕组相电压仿真计算结果与估算值对比见表 1。

表 1　HVmax-MV 空载运行绕组相电压计算结果对比

Tab.1　Comparison between calculation results of winding no-load phase voltage of HVmax-MV

铁心柱	绕组名称	仿真值 /V	估算值 /V
主柱 I	HV	86 167.2	86 523.0
	EV	56 589.2	56 833.7
主柱 II	MV	230 849.8	230 940.1
	BV	37 736.0	37 747.8
	TV	19 082.2	19 086.0
	LV	14 841.4	14 844.6

铁心磁场仿真如图 6 和图 7 所示。

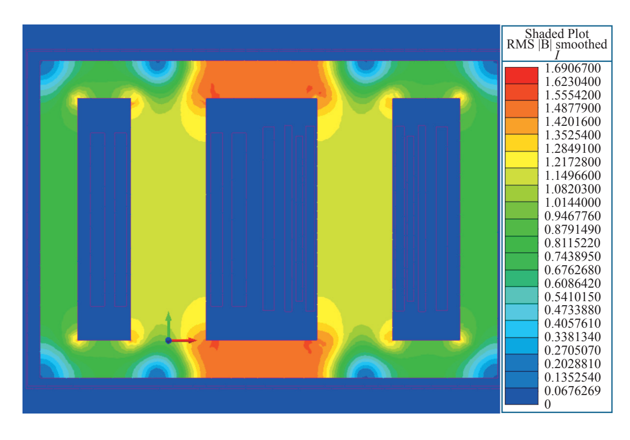


图 6　HVmax-MV 空载运行铁心中的磁密分布云图

Fig.6　Magnetic flux distribution in iron core with no-load operation HVmax-MV

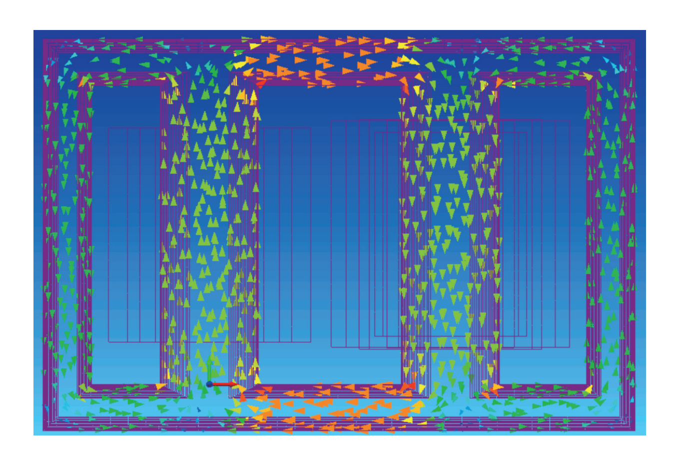


图 7　HVmax-MV 空载运行铁心中的磁密矢量图

Fig.7　Magnetic density vector diagram of HVmax-MV no-load operation core

铁心主柱中的磁密仿真计算结果与估算值对比见表 2。

表 2　HVmax-MV 空载运行铁心主柱磁密计算结果对比

Tab.2　Comparison between calculation results of magnetic flux density of main column for no-load operation HVmax-MV

磁通密度	仿真值 /T	估算值 /T
主柱 I 心柱	$1.226\times\sqrt{2}=1.734$	1.749
主柱 II 心柱	$1.226\times\sqrt{2}=1.734$	1.749

5.1.2　短路仿真

将主柱 II 的 MV 绕组短路，HV 绕组加电流源激励：$I_1=787.3\times\sqrt{2}=1\ 113.4$A，TV 绕组与 BV 绕组正串后与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 8 所示。

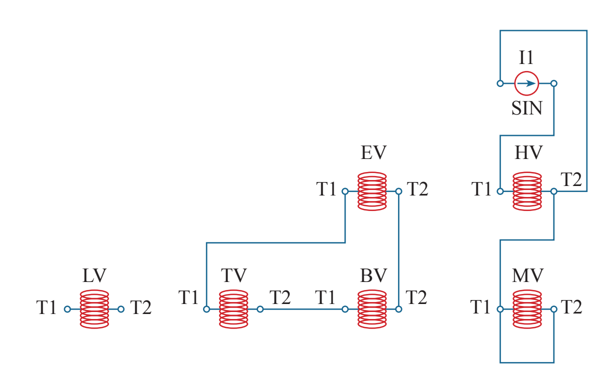


图 8　HVmax-MV 短路运行等效电路

Fig.8　HVmax-MV short-circuit operation equivalent circuit

各绕组相电流仿真计算结果与估算值对比见表 3。

计算得到磁场能量：$W_S=60\ 059.2$ J

等值电感：$L_K=2W_S/I_{max}^2=193.8$mH

短路电抗：$X_K=2\pi fL_K=60.9\Omega$

表 3　HVmax-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.3　Comparison of calculation results of phase currents in HVmax-MV short-circuit winding

铁心柱	主柱 I		主柱 II		
绕组名称	HV	EV	MV	BV	TV
仿真值 /A	787.3	1 198.4	294.9	1 198.4	1 198.4
估算值 /A	787.3	1 198.6	295.0	1 198.6	1 198.6

阻抗电压：$U_K\%=I_{max}X_K/U_{max}\times 100\%=15.09\%$

根据以上计算所得的阻抗电压值，主柱 II 的 MV 绕组短路，加电压源激励：$V_1=\frac{550\ 000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\times 15.09\%\div 2=33\ 882.6$V，运行等效电路如图 9 所示。

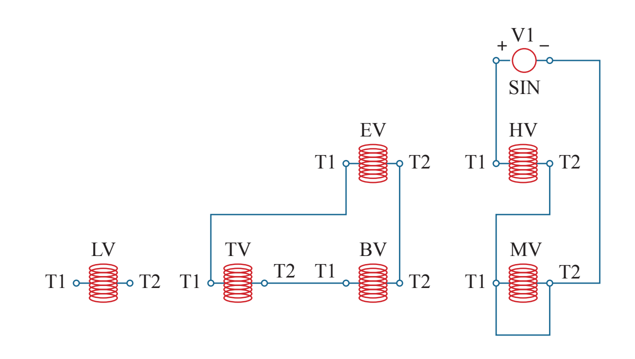


图 9　HVmax-MV 短路运行等效电路

Fig.9　HVmax-MV short-circuit operation equivalent circuit

各绕组相电流仿真计算结果与估算值对比见表 4。

表 4　HVmax-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.4　Comparison of calculation results of phase currents in HVmax-MV short-circuit winding

铁心柱	主柱 I		主柱 II		
绕组名称	HV	EV	MV	BV	TV
仿真值 /A	787.0	1 198.0	294.8	1 198.0	1 198.0
估算值 /A	787.3	1 198.6	295.0	1 198.6	1 198.6

能量为 60 013.4J，与之前施加电流源结果基本一致。

5.2　仿真工况 2：HV-MV 运行，HV 绕组额定分接

5.2.1　空载仿真

将主柱 II 的 MV 绕组加电压源激励：$V_1=\frac{400\ 000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\div 2=163\ 299.3$V，TV 绕组退出，BV 绕组与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 10 所示。

各绕组相电压仿真计算结果与估算值对比见表 5。

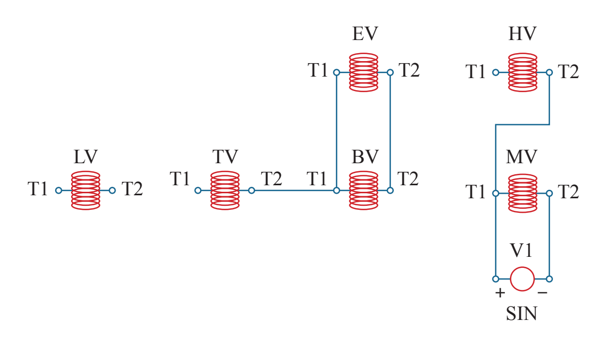


图 10　HVrat-MV 空载运行等效电路

Fig.10　HVrat-MV no-load operation equivalent circuit

表 5　HVrat-MV 空载运行绕组相电压计算结果对比

Tab.5　Comparison between calculation results of phase-ground voltage of no-load HVrat-MV

铁心柱	主柱Ⅰ		主柱Ⅱ		
绕组名称	HV	EV	MV	BV	LV
仿真值 /V	57 222.4	37 586.2	230 799.0	37 731.8	14 840.6
估算值 /V	57 466.8	37 747.8	230 940.1	37 747.8	14 844.6

铁心磁场仿真如图 11 和图 12 所示。

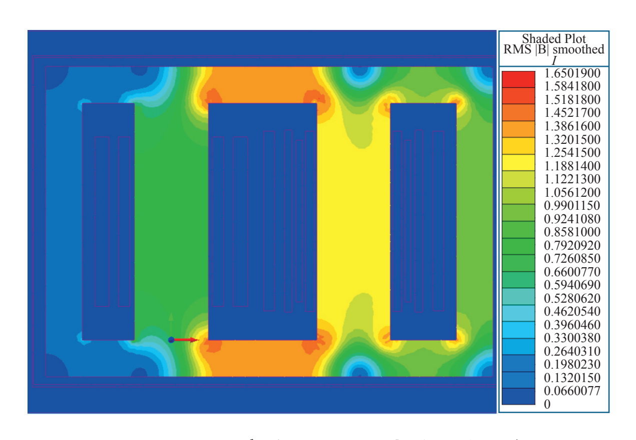


图 11　HVrat-MV 空载运行铁心中的磁密分布云图

Fig.11　Magnetic flux distribution in iron core of no-load operation HVrat-MV

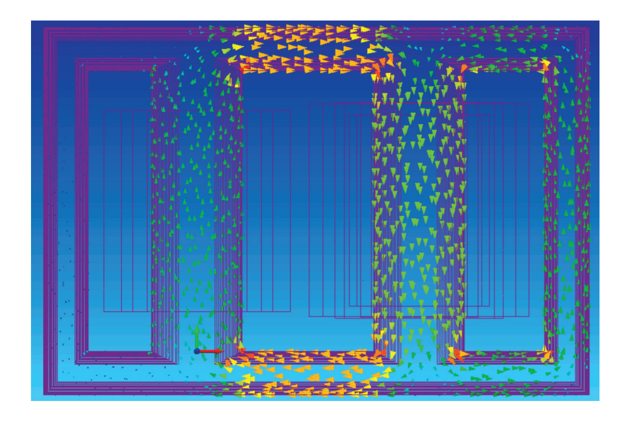


图 12　HVrat-MV 空载运行铁心中的磁密矢量图

Fig.12　Magnetic density vector diagram of HVrat-MV no-load operation core

铁心主柱中的磁密仿真计算结果与估算值对比见表 6。

表 6　HVrat-MV 空载运行铁心主柱磁密计算结果对比

Tab.6　Comparison between calculation results of magnetic flux density in main column for no-load operation HVrat-MV

磁通密度	仿真值 /T	估算值 /T
主柱Ⅰ心柱	$0.814\times\sqrt{2}=1.51$	1.161
主柱Ⅱ心柱	$1.226\times\sqrt{2}=1.734$	1.749

5.2.2　短路仿真

将主柱Ⅱ的 MV 绕组短路，HV 绕组加电流源激励：$I_1=866.0\times\sqrt{2}=1\ 224.7\text{A}$，TV 绕组退出，BV 绕组与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 13 所示。

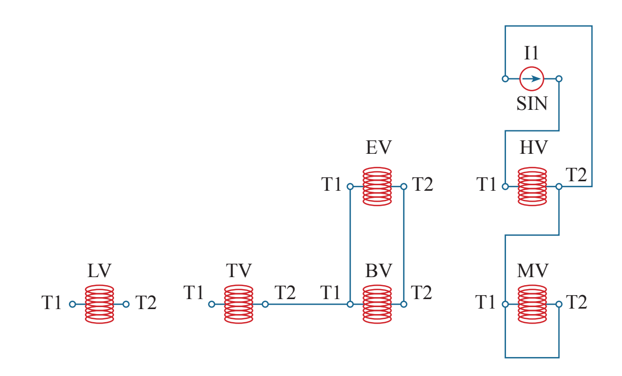


图 13　HVrat-MV 短路运行等效电路

Fig.13　HVrat-MV short-circuit operation equivalent circuit

各绕组相电流仿真计算结果与估算值对比见表 7。

表 7　HVrat-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.7　Comparison of calculation results of phase currents in HVrat-MV short-circuit winding

铁心柱	主柱Ⅰ		主柱Ⅱ	
绕组名称	HV	EV	MV	BV
仿真值 /A	866.0	1 318.3	215.5	1 318.3
估算值 /A	866.0	1 318.4	215.7	1 318.4

计算得到磁场能量：$W_S=49\ 146.4\text{J}$

等值电感：$L_K=2W_S/I_N^2=131.1\text{mH}$

短路电抗：$X_K=2\pi fL_K=41.2\Omega$

阻抗电压：$U_K\%=I_NX_K/U_N\times100\%=12.35\%$

根据以上计算所得的阻抗电压值，主柱Ⅱ的 MV 绕组短路，加电压源激励：$V_1=\dfrac{500\ 000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\times12.35\%\div2=25\ 209.3\text{V}$，运行等效电路如图 14 所示。

各绕组相电流仿真计算结果与估算值对比见表 8。

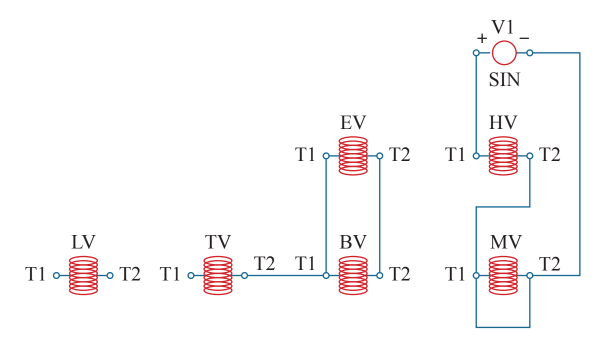


图 14 HVrat-MV 短路运行等效电路

Fig.14 HVrat-MV short-circuit operation equivalent circuit

表 8 HVrat-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.8 Comparison between calculation results of phase currents in HVrat-MV short-circuit winding

铁心柱	主柱 I		主柱 II	
绕组名称	HV	EV	MV	BV
仿真值 /A	865.8	1 318.0	215.4	1 318.0
估算值 /A	866.0	1 318.4	215.7	1 318.4

能量为 49 123.2 J，与之前施加电流源结果基本一致。

5.3 仿真工况 3：HV-MV 运行，HV 绕组最小分接

5.3.1 空载仿真

将主柱 II 的 MV 加电压源激励 $V_1=\dfrac{400\,000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\div 2=163\,299.3\text{V}$，TV 绕组与 BV 绕组反串（或将 TV 绕组的绕向反置）后与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 15 所示。

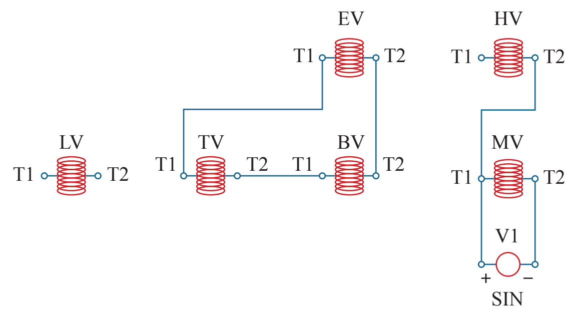


图 15 HVmin-MV 空载运行等效电路

Fig.15 HVmin-MV no-load operation equivalent circuit

各绕组相电压仿真计算结果与估算值对比见表 9。

铁心磁场仿真如图 16 和图 17 所示。

铁心主柱中的磁密仿真计算结果与估算值对比见表 10。

5.3.2 短路仿真

将主柱 II 的 MV 短路，HV 加电流源激励：$I_1=$

表 9 HVmin-MV 空载运行绕组相电压计算结果对比

Tab.9 Comparison between calculation results of phase voltage of no-load HVmin-MV

铁心柱	绕组名称	仿真值 /V	估算值 /V
主柱 I	HV	28 334.4	28 410.5
	EV	18 652.2	18 661.8
主柱 II	MV	230 338.2	230 940.1
	BV	37 673.6	37 747.8
	TV	19 059.6	19 086.0
	LV	14 824.4	14 844.6

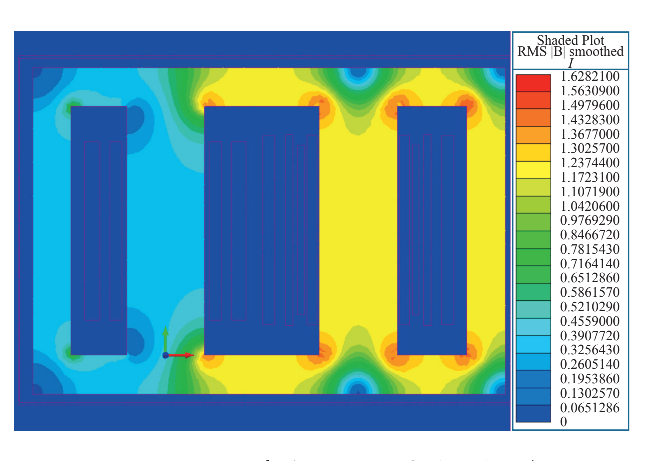


图 16 HVmin-MV 空载运行铁心中的磁密分布云图

Fig.16 Magnetic flux distribution in iron core of no-load HVmin-MV

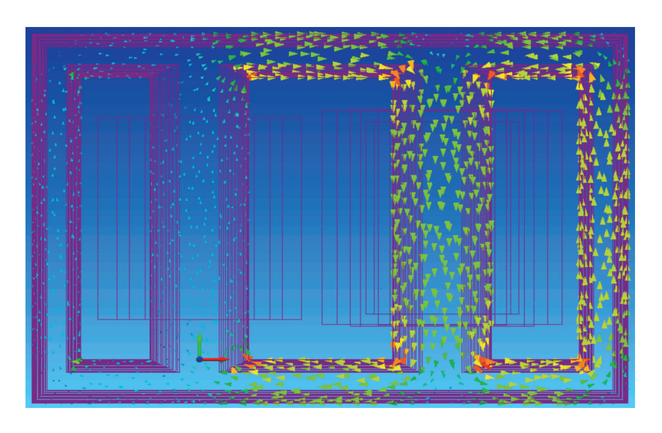


图 17 HVmin-MV 空载运行铁心中的磁密矢量图

Fig.17 Magnetic density vector diagram of HVmin-MV no-load operation core

表 10 HVmin-MV 空载运行铁心主柱磁密计算结果对比

Tab.10 Comparison between calculation results of magnetic flux density in main column of no-load HVmin-MV

磁通密度	仿真值 /T	估算值 /T
主柱 I 心柱	$0.402\times\sqrt{2}=0.568$	0.574
主柱 II 心柱	$1.226\times\sqrt{2}=1.734$	1.749

$962.3\times\sqrt{2}=1\,360.9$A，TV 绕组与 BV 绕组反串（或将 TV 绕组的绕向反置）后与 EV 绕组并联，运行等效电路如图 18 所示。

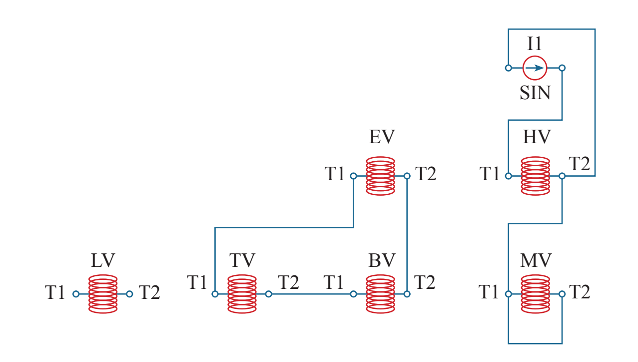


图 18　HVmin-MV 短路运行等效电路

Fig.18　HVmin-MV short-circuit operation equivalent circuit

各绕组相电流仿真计算结果与手算值对比见表 11。

表 11　HVmin-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.11　Comparison between short-circuit currents calculating results of HVmin-MV winding

铁心柱	主柱 I		主柱 II		
绕组名称	HV	EV	MV	BV	TV
仿真值 /A	962.3	1 464.9	118.4	1 464.9	1 464.9
估算值 /A	962.3	1 465.0	118.6	1 465.0	1 465.0

计算得到磁场能量：$W_S=47\,971.8$ J

等值电感：$L_K=2W_S/I^2_{min}=127.9$mH

短路电抗：$X_K=2\pi f L_K=40.2\Omega$

阻抗电压：$U_K\%=I_{min}X_K/U_{min}\times100\%=12.06\%$

根据以上计算所得的阻抗电压值，主柱 II 的 MV 绕组短路，加电压源激励：$V_1=\frac{450\,000}{\sqrt{3}}\times\sqrt{2}\times12.06\%\div2=22\,155.6$V，运行等效电路如图 19 所示。

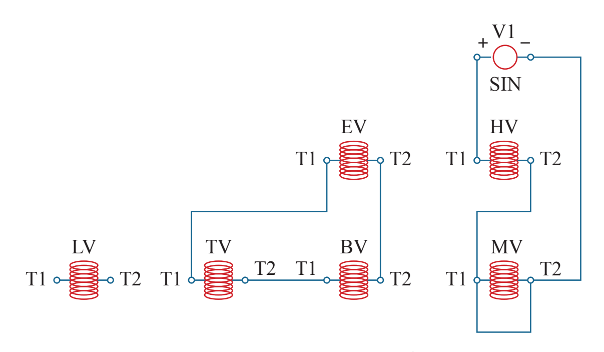


图 19　HVmin-MV 短路运行等效电路

Fig.19　HVmin-MV short-circuit operation equivalent circuit

各绕组相电流仿真计算结果与估算值对比见表 12。

表 12　HVmin-MV 短路运行绕组相电流计算结果对比

Tab.12　Comparison between short-circuit currents calculating results of HVmin-MV winding

铁心柱	主柱 I		主柱 II	
绕组名称	HV	EV	MV	BV
仿真值 /A	962.6	1 465.4	118.4	1 465.4
估算值 /A	962.3	1 465.0	118.6	1 465.0

能量为 48 001J，与之前施加电流源结果基本一致。

6　方案对比

现将采用双主柱的单铁心方案与采用两个单主柱的双铁心方案作一简单对比，见表 13。

表 13　单、双铁心方案对比

Tab.13　Comparison between single core and double cores

项目		单铁心方案	双铁心方案
铁心型式		单相双柱三框	单相单柱双框
空载损耗 /kW		45.4	58.1
负载损耗 /kW		362.1	370.2
短路阻抗 (%)	Max	15.52	15.52
	Rat	12.56	12.56
	Min	12.07	12.07
铜线重 /t		27.4	27.4
电工钢带重 /t		57.5	73.0
油重 /t		54.5	68.5
器身重 /t		98.1	113.6
运输重 /t		125.9	146.5
总重 /t		200.9	235.5

通过对比发现，单铁心方案比双铁心方案仅主材成本就节省了约 50 万元，而单铁心方案空载损耗还较双铁心方案低 12.7kW、运输重量轻 20.6t。由于单铁心方案相比双铁心方案简化了产品的引线结构，生产制造更为简单，安全可靠性会更优。

7　结论

通过以上三种工况的磁场仿真计算，验证了采用恒、变磁通共铁心结构的自耦变压器在空载时的铁心主磁通分布、各绕组电压，以及在短路时的各绕组电流、变压器短路阻抗，仿真结果和估算结果基本吻合；利用工厂里现有的其他类型产品的双柱三框式铁心和试验绕组，套装组合成相似结构后做试验验证，也能和仿真计算吻合，所以采用该结构

的方案是完全可行的。通过对比发现，单铁心方案比双铁心方案仅主材成本一项就节省了约 21%，而单铁心方案空载损耗还较双铁心方案降低约 22%、运输重量减轻约 14%。从制造的工艺性上来说，单铁心方案结构相对简单，便于生产加工。从产品运行的角度来看，因为结构简单，安全可靠性会更强。综上，采用恒、变磁通共铁心结构的方案技术经济性能是最优的。

参考文献

[1] 武力. 电力自耦变压器效益系数的分析 (上)[J]. 变压器，2001，38(11)：1-2.
Wu Li. Analysis of efficiency coefficient of power auto-transformer[J]. Transformer, 2001, 38(11): 1-2.

[2] 孙勇，高兴耀，钟俊涛. 900MV · A 变压器的研制 [J]. 变压器，2007，44(2)：1-4.
Sun Yong, Gao Xingyao, Zhong Juntao. Development of 900MV · A transformer[J]. Transformer, 2007, 44(2): 1-4.

[3] 李程，徐天奇，谢辉. 自顶向下的变压器 Pro/E 三维参数化设计 [J]. 变压器，2007，44(10)：16-19.
Li Cheng, Xu Tianqi, Xie Hui. Pro/E 3-dimension parametric top-down design of transformer[J]. Transformer, 2007, 44(10): 16-19.

[4] 辜承林. 电力变压器铁心磁场、损耗和温度场的理论与计算 [M]. 武汉：华中理工大学出版社，1993：25-33.

[5] 李朗如，陈乔夫，周理兵. 电磁装置设计原理 [M]. 北京：中国电力出版社，2017：251.